

多板串接板条激光器的理论研究

廖 严 何慧娟 李永春 顾圣如 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所激光技术开放实验室, 上海 201800)

提 要

讨论了多板串接时板条激光器的模体积匹配问题;并用数值计算分析了板条介质在腔内串接时,谐振腔参数的最佳选择.

关键词 模体积匹配, 多板串接.

1 引 言

单根棒状介质构成的激光器由于热聚焦及应力聚焦等热效应,其平均输出激光功率受到很大限制.为研制高平均功率输出的固体激光器,人们曾将多根棒状激光介质在谐振腔内串联放置^[1,2].文献[1]中报道了 6 根 YAG 棒串接的激光器,其最大输出平均功率可达 2400 W.板条固体激光器由于它的结构相对于棒状结构的优越性^[3],可以消除一阶热聚焦及应力聚焦效应而获得比同体积棒状激光器高得多的输出平均功率.但在高平均功率泵浦下,实际上板状激光器仍存在一定的热聚效应,加之板条激光器要求高质量,大尺寸的激光材料,所以在 10^3 W 量级激光输出的固体激光器研究中,板条串接应是一种可供选择的方案.因此,有必要研究板条串接中的模体积匹配及腔参数选择.本文针对板条结构定义了串接时各板条之间的模体积匹配程度参量.数值计算和讨论了不完全相同的板条介质在腔内串接时,谐振腔参数的最佳选择.

2 理论描述

具有 N 块板条的谐振腔,由 $ABCD$ 定律求得腔内任意位置的高斯光束光斑尺寸及曲率.由于板条系统与棒状介质不同,是非轴对称的,即使采用轴对称的球面镜腔,板条介质的宽度(x 方向)与厚度(y 方向)的热透镜焦距是不同的,其基模呈椭圆高斯光束,所以在 x, y 两个方向上应分别考虑.每块板条的每一端面上的光斑也均须由二个参数表征.

假设第 i 块板条两端面的基模光斑尺寸*为 $(2\omega_{ix_1}, 2\omega_{iy_1})$ 及 $(2\omega_{ix_2}, 2\omega_{iy_2})$. 根据板条的特点及尺寸不完全相同的因素,为了表征被利用的激活介质体积占总激活介质体积的比例.定义 N 块板条振荡基模体积的相互匹配程度参量 Q

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{l_i}{6} [\omega_{ix_1}\omega_{iy_1} + \omega_{ix_2}\omega_{iy_2} + (\omega_{ix_1} + \omega_{ix_2})(\omega_{iy_1} + \omega_{iy_2})]}{H\omega_x\omega_y}, \quad (1)$$

收稿日期:1992 年 4 月 30 日;收到修改稿日期:1992 年 6 月 25 日

* 由于实验采用的腔内限模光阑是板条的矩形口径,所以板条激光器输出光斑呈矩形.

式中 $l_i, 2a_i$ 和 $2b_i$ 分别为第 i 块板条的长度、宽度和厚度. 若在所有的 ω_{ix_k}/a_i ($k = 1, 2$) 中最大值为 $\omega_{j_{x_{k'}}}/a_j$; ($k' = 1$ 或 $k' = 2$), 则

$$\omega_x = (\omega_{j_{x_{k'}}}/a_j), \quad (k' = 1 \text{ 或 } k' = 2) \quad (2)$$

同理在所有的 ω_{iy_k}/b_i ($k = 1, 2$) 中最大值为 $\omega_{j_{y_{k'}}}/b_j$ ($k' = 1$ 或 $k' = 2$), 则

$$\omega_y = \omega_{j_{y_{k'}}}, \quad (k' = 1 \text{ 或 } k' = 2) \quad (3)$$

$$H = \sum_{i=1}^N a_i b_i l_i, \quad (4)$$

激光器多模工作时, 整个系统的横模的阶次为⁽⁴⁾

$$(1/\omega_x) = \sqrt{2m_x + 1}, \quad (1/\omega_y) = \sqrt{2m_y + 1}, \quad (5)$$

式中 m_x, m_y 分别为宽度及厚度方向的模数. 第 i 块板条两端面的多模光斑半径为

$$\left. \begin{aligned} \omega_{ix_1}^{(m)} &= \omega_{ix_1} \sqrt{2m_x + 1}, & \omega_{iy_1}^{(m)} &= \omega_{iy_1} \sqrt{2m_y + 1}, \\ \omega_{ix_2}^{(m)} &= \omega_{ix_2} \sqrt{2m_x + 1}, & \omega_{iy_2}^{(m)} &= \omega_{iy_2} \sqrt{2m_y + 1}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

归一化的激光振荡多模体积 Q_s 为

$$\left. \begin{aligned} Q_s &= P_s/H, \\ P_s &= \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{6} [\omega_{ix_1}^{(m)} \omega_{iy_1}^{(m)} + \omega_{ix_2}^{(m)} \omega_{iy_2}^{(m)} + (\omega_{ix_1}^{(m)} + \omega_{ix_2}^{(m)}) (\omega_{iy_1}^{(m)} + \omega_{iy_2}^{(m)})], \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

若腔镜 M_1, M_2 处基模光斑半径分别为 ω_{1x}, ω_{1y} 和 ω_{2x}, ω_{2y} , 而输出耦合镜又满足“匹配”条件*, 多模光束发散角为:

由 M_1 输出:

$$\theta_{m_{1x}} = \frac{\lambda}{\pi \omega_{1x}} \sqrt{2m_x + 1}, \quad \theta_{m_{1y}} = \frac{\lambda}{\pi \omega_{1y}} \sqrt{2m_y + 1}, \quad (8)$$

由 M_2 输出:

$$\theta_{m_{2x}} = \frac{\lambda}{\pi \omega_{2x}} \sqrt{2m_x + 1}, \quad \theta_{m_{2y}} = \frac{\lambda}{\pi \omega_{2y}} \sqrt{2m_y + 1}, \quad (9)$$

理论及实验均指出^(2,5,6), 最有效的串接振荡是使用完全对称的周期性谐振腔, 如图 1 所示, 其中焦距 $f = (R/2)$ 的镜对腔内光束的变换等效于一个曲率半径为 R 的球面镜的作用, 并且要求串接的介质尺寸及热效应完全相同. 这样理论上可得到的激光输出为单个介质输出的直接累加, 而输出光斑尺寸与发散角不变, Q 参数为 1.

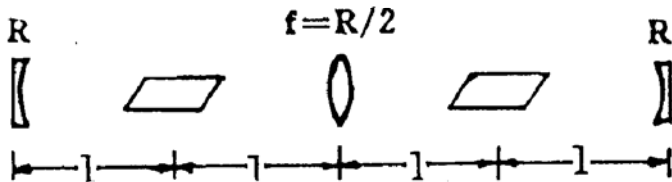


Fig. 1 A schematic of symmetrical periodic resonator

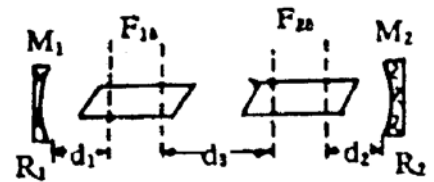


Fig. 2 Resonator with two slabs

考虑内含两块板条介质的谐振腔(如图 2 所示), 每块板条都可以等效于一个厚透镜, 其在 x, y 平面上焦距通常是不等的, 而是由泵浦强度所决定. 用 G 参数等价腔法, 以 M_1 镜为参考, 腔内单程传播矩阵为

* 设输出耦合镜内外曲率半径为 R, R_r , 并满足条件 $R_r = [1 - (1/n)]R$, n 为镜材料的折射率.

$$\begin{pmatrix} A_d & B_d \\ C_d & D_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_{2\delta} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_{2\delta} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} A_d &= \left(1 - \frac{d_2}{F_{2\delta}}\right) \left(1 - \frac{d_3}{F_{1\delta}}\right) - \frac{d_2}{F_{1\delta}}, & B_d &= d_1 A_d + d_2 + d_3 \left(1 - \frac{d_2}{F_{2\delta}}\right), \\ C_d &= \frac{1}{F_{1\delta}} - \frac{1}{F_{2\delta}} + \frac{d_3}{F_{1\delta} F_{2\delta}}, & D_d &= 1 - \frac{d_3}{F_{2\delta}} - \frac{d_1}{F_{1\delta}} - \left(\frac{d_1}{F_{2\delta}}\right) \left(1 - \frac{d_3}{F_{1\delta}}\right), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 d_1, d_2, d_3 均为从主平面开始计算的距离. 于是得等价 G 参数为

$$G_{1\delta} = A_d - (B_d/R_1), \quad G_{2\delta} = D_d - (B_d/R_2). \quad (\delta = x, y) \quad (12)$$

设

$$G_s = G_{1\delta} G_{2\delta}, \quad (\delta = x, y) \quad (13)$$

当 $0 < G_d < 1$ 时, 腔属于稳定区, 在腔镜 $i (i = 1, 2)$ 上的基模光斑尺寸 $2\omega_{i0}$ 为

$$\omega_{i0}^2 = \frac{\lambda B_\delta}{\pi} \sqrt{\frac{G_{1\delta}}{G_{1\delta}(1 - G_{1\delta} G_{2\delta})}} \quad (i \neq j = 1, 2) \quad (14)$$

B_δ 为光腔的等价腔长. 当 $F_{1\delta}, F_{2\delta} \rightarrow \infty$ 时, 板条无热效应, 此时光腔即为腔长 $L = d_1 + d_2 + d_3$ 的空腔,

$$G_1 = 1 - (L/R_1), \quad G_2 = 1 - (L/R_2). \quad (15)$$

当 $F_{1\delta} = F_{2\delta} = F_\delta$ 时若 $d_3 = 0$, 则

$$\left. \begin{aligned} G_{1\delta} &= 1 - \frac{L}{R_1} - \left(\frac{2d_2}{F_d}\right) \left(1 - \frac{d_1}{R_1}\right), & G_{2\delta} &= 1 - \frac{L}{R_2} - \left(\frac{2d_1}{F_d}\right) \left(1 - \frac{d_1}{R_2}\right), \\ B_\delta &= L - (2d_1 d_2 / F_d), & L &= d_1 + d_2. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

即等效于仅含一个热透镜, 其热焦距为 $F_\delta/2$ 的光腔.

3 数值计算及分析

考虑两块尺寸 ($b \times a \times l$) 分别为 $5.9 \times 20 \times 120$ (mm) 及 $6 \times 18 \times 125$ (mm) 的板条, 其相应的等效热厚透镜焦距分别为 $F_{1x} = -3.7$ m, $F_{1y} = -2.7$ m; $F_{2x} = -3.9$ m, $F_{2y} = -2.9$ m, 在对称双凹腔情况下, 用数值计算作图的方法讨论了激光振荡的模体积匹配、归一化多模体积及输出发散角等与光腔参数变化的关系. 如图 2 所示的谐振腔, $R_1 = R_2 = 2$ m, $d_3 = 0.5$ m 时图 3 是用数值计算画出了表述模体积匹配程度的参数 Q 的等 Q 值曲线, 其横坐标为 d_1 , 纵坐标为 d_2 , 图中任一条曲线上每一点都有相等的 Q 值. 图 4 为在 $d_1 d_2$ 平面上, 等值的多模归一化体积的曲线. 设激光由 M_2 端镜面输出, 且满足“匹配”条件. 由计算得到图 5(a)、(b) 分别为 x 及 y 方向的等模数曲线, 而图 6(a)、(b) 分别为相应方向的等多模发散角曲线. 由图中可以看出, 模体积匹配程度参量 Q 随 d_1, d_2 增加略有增加, 而归一化多模体积则在 $d_1 d_2$ 平面上划分了不同的闭合区域. 若是两块板尺寸完全相同, 当两块板条介质的四个端面上基模光斑尺寸在相同的方向上相等时, 光束将充满两块板条介质的整个空间, 匹配程度参数 $Q = 1$, 表征两块板条完全匹配, 此时的输出平均功率最高, 归一化多模体积 Q_s 也达至最大值; 但在两块板条不完全相同时, 光束仅充满介质的部分空间, 激活介质不能被完全利用, 故 $Q < 1$, 此时只能通过调整 d_1, d_2 , 使 Q 值尽量高, Q_s 值尽量大; 振荡模的阶次则随 d_1, d_2 的增加而减小, 其物理意义是, 随着腔长的增加, 基模光斑尺寸也随之增大, 介质内可容振荡模次降低, 因而输出光束发散角减小.

选择工作区要求: 腔长不能过长即 d_1, d_2 不能太大, Q, Q_s 值尽量高以提高输出效率, 尽可能低阶模输出, 以减小输出光束发散角, 提高输出光束质量. 因此, 最佳工作区应选在 $d_1 \approx 300$

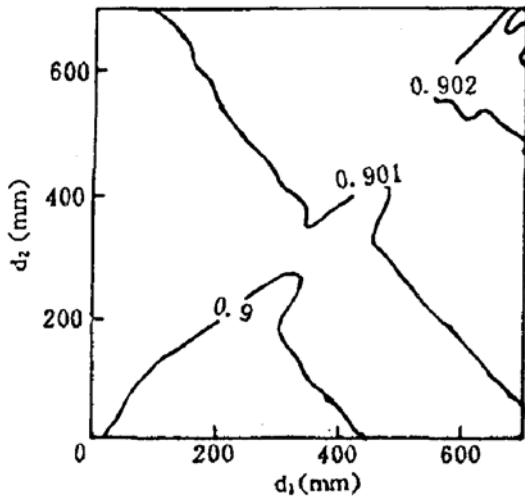


Fig. 3 The mode volume matching parameter Q vs. d_1, d_2

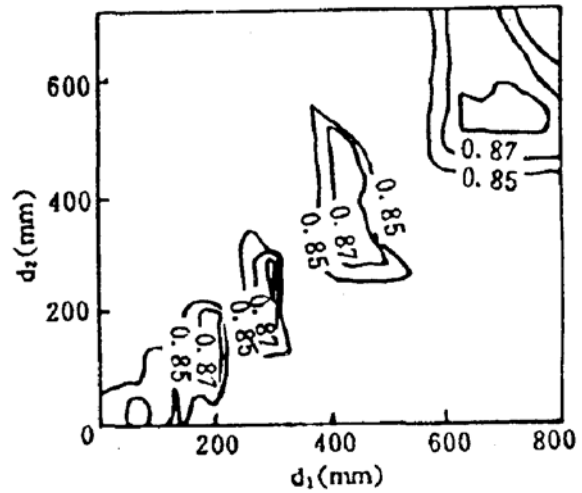


Fig. 4 The normalized multimode volume Q_n vs. d_1, d_2

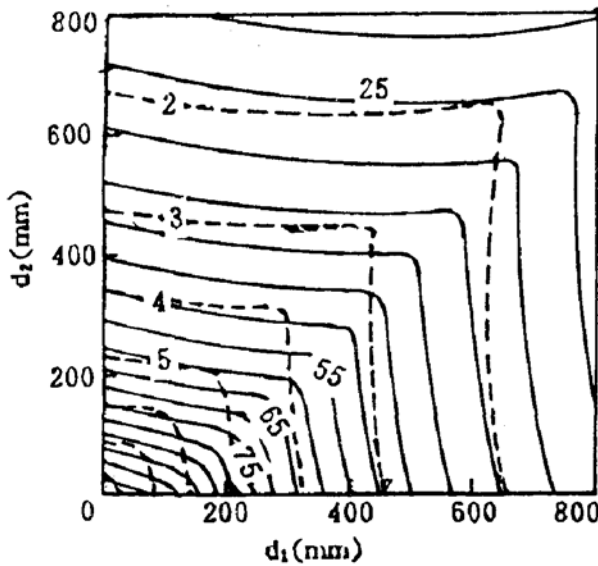


Fig. 5 The mode orders vs. d_1, d_2 . (a) m_x solid line, (b) m_y dash line

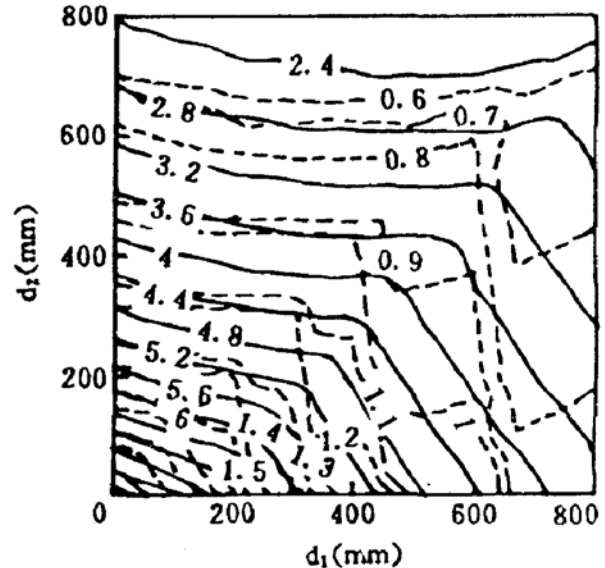


Fig. 6 The multimode divergence angles (mrad) vs. d_1, d_2 . (a) θ_{zmx} solid line, (b) θ_{zmy} dash line

$mm, d_2 \approx 270 mm$ 处,在该工作点附近, x 方向的 G 参数值(如图 7(a))约为 0.48, y 方向的 G 参数值(如图 7(b))约为 0.61. 文献[7]中指出,光腔 g 参数满足 $G = 1/2$ 时,光斑尺寸对光腔 g 参数变化不敏感,所以对引起 g 参数变化的等效热透镜焦距变化也不敏感. 故选择的工作点是近热稳的,如图 8 所示. 在板条等效热透镜焦距波动达 $\pm 10\%$ 以上时,输出基模光斑尺寸(决定发散角)变化范围小于 $\pm 5\%$. 由多模光斑尺寸与基模光斑尺寸的关系(5)、(6)式,对近热稳的基模光斑,多模光斑的变化也不会太大,输出在工作点附近具有一定的热稳性.

以上分析很容易推广到两块以上的板条串接情况. 有关的实验工作正在进行,将另文发表.

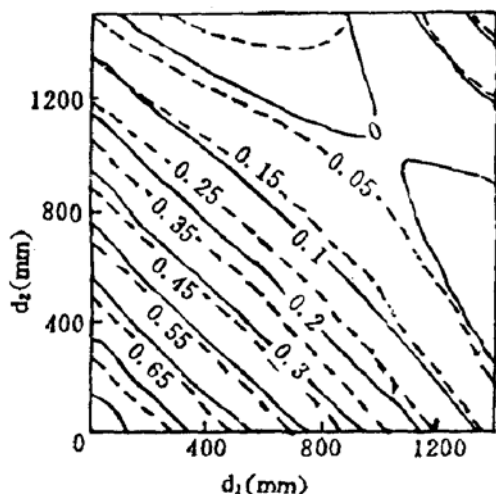


Fig. 7 The G parameters vs d_1, d_2 . (a) G_x solid line, (b) G_y dash line

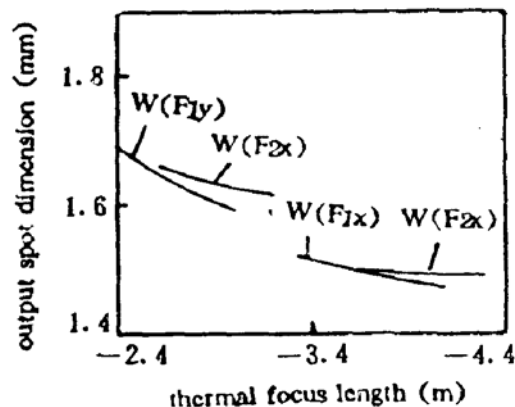


Fig. 8 The output fundamental spot dimensions $2W_{2x}, 2W_{2y}$ vs thermal focus length

$W(F_{1x}) - W_{2x}$ vs F_{1x} ; $W(F_{2x}) - W_{2x}$ vs F_{2x}
 $W(F_{1y}) - W_{2y}$ vs F_{1y} ; $W(F_{2y}) - W_{2y}$ vs F_{2y}

参 考 文 献

- [1] S. Yoshida, S. Nishimura, S. Imai *et al.*, 2.4-kW YAG laser and its uses. CLEO '90, CTUJ4
- [2] K. P. Driedger, R. M. Iffländer, H. Weber, Multirod resonators for high power solid state lasers with improved beam quality. *IEEE J. Q. E.*, 1988, QE-24(4):665~673
- [3] J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*, The slab geometry laser-part I: Theory. *IEEE J. Q. E.*, 1984, QE-20(3):289~300
- [4] H. P. Kortz, R. Iffländer, H. Weber, Stability and beam divergence of multimode lasers with internal variable lenses. *Appl. Opt.*, 1981, 20(23):4124~4134
- [5] V. R. Kushnir, A. N. Nemkov, N. V. Shkunov, Influence of the resonator geometry on the output power of a laser with several active elements. *Sov. J. Q. E.*, 1975, 5:713~715
- [6] J. M. Eggleston, Periodic resonators for average-power scaling of stable-resonator solid-state lasers. *IEEE J. Q. E.*, 1988, QE-24(9):1821~1824
- [7] J. Steffen, Jean-Pierre Lörtscher, G. Herziger, Fundamental mode radiation with solid-state lasers. *IEEE J. Q. E.*, 1972, QE-8(2):239~245

Theoretical study on multi-slab in series in slab laser

LIAO Yan HE Huijuan LI Yongchun GU Shengru WANG Zhijiang

(Laboratory of Laser Technology, Shanghai Institute of Optics and
 Fine Mechanics, Academia Sinica 201800)

(Received 30 April 1992; revised 25 June 1992)

Abstract

The mode volume matching problem of multi-slab in series in slab laser was investigated in this paper. With computer calculations, the optimization parameter of the multi-slab placed in a common resonator was derived.

Key words mode volume matching, multi-slab in series.